

## University of Groningen

### Water in protoplanetary disks

Antonellini, Stefano

**IMPORTANT NOTE:** You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

*Document Version*

Publisher's PDF, also known as Version of record

*Publication date:*

2016

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

*Citation for published version (APA):*

Antonellini, S. (2016). *Water in protoplanetary disks: Line flux modeling and disk structure*. [Thesis fully internal (DIV), University of Groningen]. Rijksuniversiteit Groningen.

#### **Copyright**

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

#### **Take-down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

*Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.*

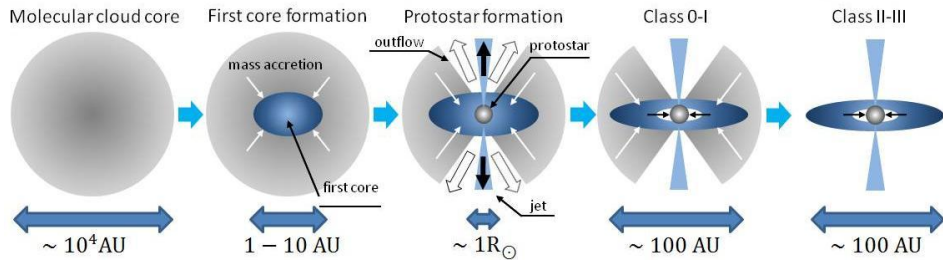
## Nederlandse Samenvatting

“Hoe uniek is de mens?” werd één van de belangrijkste vragen van de mensheid na het verdwijnen van het Aristoteliaanse wereldbeeld. De Aristoteliaanse leer zag alles buiten de Aarde als een realiteit waarin de natuurkundige wetten niet waren zoals op Aarde, en beperkte daarom sterk de grootte van het Heelal, maar ook het natuurkundig onderzoek naar deze realiteit. In de 17<sup>e</sup> eeuw bracht het ineensstorten van het beeld dat de mens als centrum van het Universum optreedt juist het gevoel dat we onbeduidend waren in het Heelal. Baanbrekende denkers zoals Giordano Bruno kwamen met de mogelijkheid dat er ook andere planeten bestaan zoals de Aarde, met leven en beschavingen. Het zou echter nog tot de 20<sup>e</sup> eeuw duren voor er een wetenschap was die deze onderwerpen actief bestudeert en verder ontwikkelt. De meest geavanceerde studies van deze tijd zijn onder andere de ‘Search for Extraterrestrial Intelligencies’ (De zoektocht naar buitenaardse intelligentie, het SETI programma), de missies naar de planeet Mars met verkenningsvoertuigen en tot slot de waarneming en bestudering van planeten rondom andere sterren (exoplaneten). Sinds 1995 weten we dat exoplaneten bestaan en sinds 2009 hebben we goede statistieken over deze planeten. Vanaf 2013 hebben we ook de atmosferen van de grotere exoplaneten kunnen bestuderen, en in de toekomst zullen we de atmosferen kunnen bestuderen van aardachtige planeten en wellicht de aanwezigheid van leven kunnen traceren.

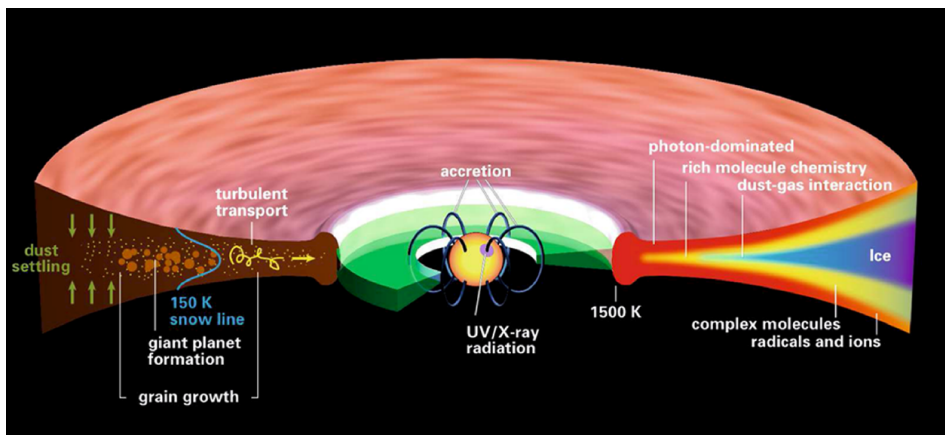
De geboorte van ons Zonnestelsel en al deze andere buitenaardse werelden gebeurt met een langzaam proces dat begint met de vorming van nieuwe sterren. Als eerste stort een dichte gaswolk ineen (ongeveer  $10^3$ - $10^4$  atomen per  $\text{cm}^{-3}$ ). Deze wolk is erg koud (slechts enkele graden boven het absolute nulpunt) en bestaat uit moleculen (vooral waterstof) en ongeveer 1% silicaatstof van minder dan een micrometer groot ( $0.1 \mu\text{m}$ ). Het vormen van een ster kost in de orde van miljoenen jaren, afhankelijk van hoe zwaar de ster uiteindelijk is. In deze periode zal de initiële wolk ineensstorten en een dichte en hete kern maken: de protoster. Wanneer de nucleaire reacties in de protoster beginnen en uiteindelijk waterstoffusie aanvangt wordt het een ster. Intussen vormt het gas rondom de ster (dat nog steeds invalt op de ster) onder invloed van de zwaartekracht en draaiing een schijf (Figuur 6.1).

Deze zogenaamde protoplanetaire schijf is aan de buitenste rand tienduizenden keer zo dicht als de oorspronkelijke wolk, tot zelfs miljoenen keren zo dicht in de binnenste gebieden (ongeveer de helft van de afstand Aarde-Zon, de Astronomische Eenheid). In de gebieden dicht bij de centrale ster wordt de dichtheid zelfs vergelijkbaar met die in de atmosfeer van planeten. De temperaturen in protoplanetaire schijven zijn hoog (tot wel honderden of duizenden graden) en ook de straling geproduceerd door de jonge ster is zeer intens (Figuur 6.2). Deze objecten kunnen erg groot worden, tot wel enkele malen de afstand van de zon tot de Kuiper gordel (150-200 astronomische eenheden).

Onder deze omstandigheden ondergaat het gas zeer diverse chemische processen, waardoor er behoorlijk complexe moleculen gevormd kunnen worden.



**Figure 6.1** – Fases in de ontwikkeling van een ineenstortende moleculaire wolk tot de formatie van een centrale ster met een schijf, met dank aan Dr. Tsukamoto Yusuke.



**Figure 6.2** – Schets van de structuur van een protoplanetaire schijf. De moleculaire structuur staat aan de rechterkant, terwijl de dynamische processen en de sneeuwgrens aan de linkerkant staan (Henning & Semenov 2013).

Deze moleculen koelen af en slaan neer in de schijf terwijl ze electromagnetische straling uitzenden in het volledige infrarode spectrum tot aan radiogolven aan toe. Simpele moleculen zoals water komen veel voor, en spelen een belangrijke rol in de processen in de schijf, bijvoorbeeld door hun bijdrage aan het koelen van het gas en daardoor aan de temperatuurhuishouding van het gas. Sinds kort zijn ook complexere moleculen gevonden in protoplanetaire schijven zoals cyanoacetyleen  $\text{HC}_3\text{N}$ , acetonitril  $\text{CH}_3\text{CN}$ , maar ook methanol en acetyleen.

De abundante aanwezigheid van water in protoplanetaire schijven draagt indirect bij aan de vorming van planeten. Diverse waarnemingen ondersteunen het idee dat er planeten vormen in deze objecten. Zo weten we uit waarnemingen op sub-millimeter en millimeter golflengtes dat schijven grote stofkorrels kunnen hebben (tot tientallen centimeters groot) en dat het stof niet axiaal-symmetrisch is verdeeld. En uit waarnemingen van het nabij-infrarood weten we dat deze schijven spiraalarmen en andere indirecte bewijzen voor planeten laten zien. In 2013 kondigden astronomen aan dat ze mogelijk voor het eerst een waarneming hadden gedaan van een exoplaneet in vorming in de schijf van HD 100546. De schijf bevat “vluchtige” moleculen zoals water, maar ook koolstofmonoxide, ammoniak, methaan, koolstofdioxide, enz. Deze moleculen kunnen vastvriezen aan de stofkorrels indien de juiste druk en temperatuur is bereikt. Hierdoor wordt het stof plakkerig, waardoor er steenachtige kernen kunnen uitgroeien tot planetesimalen. Ijsreservoirs in schijven vormen ook een belangrijke opslagplaats voor moleculen die in de atmosferen van de toekomstige planeten terecht zullen komen. Deze atmosferen kunnen later verrijkt worden door de inslag van meteorieten en kometen.

Het doel van dit proefschrift is om vragen te onderzoeken en te beantwoorden over de hoeveelheid en de verdeling van water in protoplanetaire schijven. Diverse waarnemingen die gedaan zijn in het mid- en ver-infrarood hebben tegenstrijdige resultaten opgeleverd en sommige objecten hadden überhaupt geen spectraallijnen van water, met name rond sterren zwaarder dan 2 zonsmassa's en een hoge helderheid. Elke schijf heeft haar eigen fysische eigenschappen zoals haar grootte, de massa van het gas en de hoeveelheid stof, de grootte van de stofkorrels, enz. Het eerste deel van ons onderzoek is erop gericht om te bepalen welke eigenschappen verantwoordelijk kunnen zijn voor de diversiteit in de waterlijn emissie. Het tweede deel van dit onderzoek gaat over het effect dat verschillende centrale sterren hebben op de schijf. Dit is bereikt door de stralingsvelden te modelleren onder invloed van de temperatuur van de fotosfeer van deze sterren en de activiteit van hun corona. Het derde gedeelte van dit onderzoek onderzoekt de aanwezigheid van een correlatie tussen sterkte van waterlijnen in het mid-infrarood en de sterkte van een spectrale band rond  $10\text{ }\mu\text{m}$  die bijna in alle spectra is waargenomen. Deze emissie komt door stof met een grootte van enkele micrometers en zou uit dezelfde gebieden moeten komen als de waterlijnen. Ten slotte gaat het laatste hoofdstuk over de distributie van water en andere moleculen in de ijs-toestand. Het onderzoekt hoe de zogenaamde “sneeuwlijn” en “ijslijnen” (cruciaal voor de structuur van de schijf en

de samenstelling van planeten) beïnvloed worden door de tijdsafhankelijkheid van de scheikundige processen in schijven met verschillende fysieke eigenschappen.

Dit onderzoek is gedaan met het programma ProDiMo. Deze software berekent de stralingsoverdracht en de scheikundige processen in een schijfmodel met bepaalde eigenschappen. Hieruit kunnen de uiteindelijke stof- en gastemperaturen en de chemische abundanties bepaald worden, en vervolgens met deze informatie ook de lijn- en continuümsterkte.

De belangrijkste resultaten en conclusies van dit onderzoek kunnen worden samengevat in de volgende punten:

1. De sterkte van mid-infrarood waterlijnen kan worden waargenomen in schijven met een lage ondoorzichtigheid voor continuümmissie. Deze schijven hebben in verhouding weinig stof (of veel gas), of stof dat sterk gegroeid is in grootte.
2. Ver-infrarood waterlijnen zijn intrinsiek zwak. De mate waarin ze werden waargenomen was lager dan verwacht kon worden van de zeer gevoelige Herschel Ruimtetelescoop.
3. Ons model voorspelt dat zwaardere en heldere sterren sterkere mid-infrarood waterlijnen hebben, maar het was onmogelijk deze lijnen waar te nemen met eerdere instrumenten (zoals de Spitzer Ruimtetelescoop) door de lagere spectrale resolutie, de te korte sluitertijden en de grote sterkte van de continuümmissie.
4. Het ontbreken van een correlatie tussen de sterkte van mid-infrarood waterlijnen en de sterkte van de  $10\ \mu\text{m}$  silicaatband suggereert dat enkele protoplanetaire schijven een lage hoeveelheid stof of een hoge hoeveelheid gas hebben in de binnenste delen van hun schijf (binnen 10 astronomische eenheden). Dit is mogelijk een aanwijzing voor het vormen van planeten.
5. De grootte van ijsreservoirs van de belangrijkste vluchtige moleculen in schijven wordt niet beïnvloed door de tijdsafhankelijke chemische processen op periodes langer dan  $10^5$  jaar, met uitzondering van schijven met een lage ondoorzichtigheid. Echter als we de oppervlaktechemie op stofkorrels meenemen vinden we wel een verandering in de uitgebreidheid van de ijsreservoirs, maar onzekerheden in de berekeningen voor de chemische processen maken het lastig dit verschil te quantificeren.
6. Onzekerheden in de intiele chemische abundanties (het startpunt voor de evolutie van de abundanties in verschillende perioden in de schijf) hebben een grote invloed op de uiteindelijke bepaling van de massa's van de ijsreservoirs in de protoplanetaire schijven.

Dit onderzoek heeft ons voor het eerst in staat gesteld te bepalen welke factoren mogelijk verantwoordelijk zijn voor de infrarode waarnemingen van water, en om mogelijke diagnostische hulpmiddelen te vinden die specifieke eigenschappen van de schijf van geval tot geval uitelkaar kunnen halen. De tijdsafhankelijke chemische effecten op de twee-dimensionale structuur van ijs-reservoirs in schijven zijn voor het eerst onderzocht. We hebben een versimpelde beschrijving gemaakt voor deze ijsreservoirs welke gebruikt kan worden in programmacodes die de scheikundige processen niet zelf berekenen. Deze computationele versimpeling kan erg behulpzaam zijn voor complexere simulaties zoals hydrodynamische modellen.